

# 垂直汇流中空化状态分级探讨

吴建华

(南京水利科学研究院)

**摘 要:** 空化空蚀现象、特征和机理的深入了解和认识, 对于计算确定空化诱生荷载、预报空化空蚀危害等方面都有重要作用。本文系统地研究了作者根据水利工程中交汇水流和横轴旋涡空化空蚀破坏实例而设计的垂直汇流实验装置中空化发生、发展的一系列空化现象和特征, 以初生空化和阻塞空化作为空化发展的两个重要性态转变指标, 对空化的整个发生、发展和演变过程提出了一种新的分级方法, 并且对垂直汇流中的各空化状态以  $10^{-3}$  秒速度拍摄了照片。本文的工作对其它空化源空化空蚀机理的研究有参考价值。

**关键词:** 空化, 空化分级, 垂直汇流

**中国图书分类号:** TV131

在水利工程中, 交汇水流和横轴旋涡是一种常见的水利现象, 由此产生空化、空蚀破坏常常是很严重的, 长期以来, 国内外对此问题一直缺乏较为系统的研究以致现在实际工程中, 此类问题时有发生。比如, 1973年4月检查发现的安徽磨子潭水库泄洪洞进口段的空蚀破坏<sup>[1]</sup>, 四川龚咀水电站消力塘的空蚀破坏<sup>[2]</sup>和1974年8月巴基斯坦 Tarbela 水库 1<sup>号</sup>隧洞和 2<sup>号</sup>隧洞的空蚀破坏<sup>[3]</sup>等等都是这方面的重要实例。

由于空化空蚀现象和机理的复杂性, 至今甚至对一些空化源的基本空化现象和空化发生、发展演变过程还缺乏深入的了解和比较一致的认识, 对空化空蚀研究中一些基本问题还难以作出比较令人满意的回答。如空化发生、发展的水力条件、流场特性如何? 空化区结构形态及其变化规律如何? 空化区诱生的压力荷载有多大? 等等。要对这些问题给出一个满意的回答, 首先得对空化的形成、发展机理有一个比较清楚的认识, 比如, 要计算空化诱生的荷载必须给出空化区形状、大小及在不同空化状态下其特征参数等。

本文设计了垂直汇流空化试验系统, 对垂直汇流中空化的初生及其整个发展过程进行了较为详细的试验观察和分析。根据笔者研究<sup>[4]</sup>, 考虑到临界空化和阻塞空化状态前后、空化的一系列现象和特征有显著的区别, 本文对垂直汇流中空化的整个发展过程提供了一种新的分级方法, 并且提出了按此分级后各空化状态的照片。

## 1 试验系统和试验方法

### 1.1 试验系统

垂直汇流空化试验系统如图1所示, 主要由以下三部分组成:

1.1.1 循环回路包括: 水库1, 水泵进水段和水箱10, 主流管11, 支流管12, 汇流管13, 阀门5、6、7、14回水渠等。

1.1.2 动力控制装置包括:电机水泵4,控制器和电动阀等。

1.1.3 其它,主要包括:排气阀8.9,进口光滑过渡段,旁通管2等。

试验工作段(见图1虚线方框)构成一个垂直交汇进流的流动条件。由主流管、支流管和汇流管三部分组成,它们由工作断面均为 $35 \times 35\text{mm}$ 的有机玻璃方管外加钢板加固制成,空化从汇流点开始发生。工作段长 $1.2\text{M}$ ,其中主流管长 $0.25\text{M}$ ,汇流管长 $0.95\text{M}$ ,支流管长 $0.6\text{M}$ 。

支流管断面可变,用以研究在不同主支管断面比或流量比条件下空化空蚀的性能。

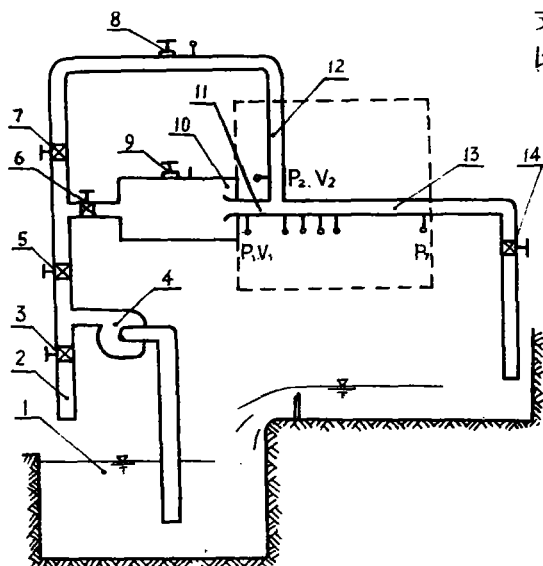


图1 垂直汇流空化试验系统示意图

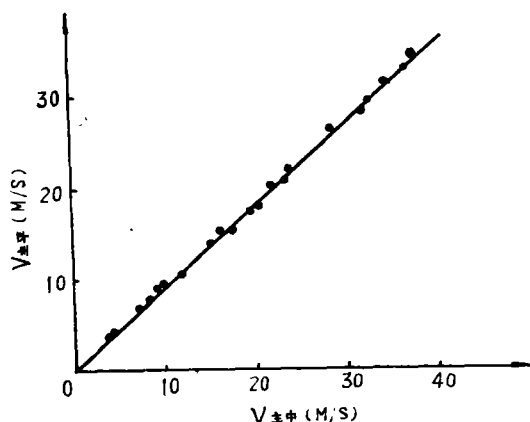


图2 主管进口 $0.1\text{m}$ 处 $V_{支平}$ 与 $V_{主中}$ 的关系

## 1.2 试验方法

试验在主支管流速等条件下进行,由预备试验得到(见图2):

$$V_{支平} = 0.9V_{主中} \quad (1)$$

式中 $V_{支平}$ 为主管平均流速, $V_{主中}$ 为管距进口 $0.1\text{M}$ 处中心最大流速,由此得到支管平均流速 $V_{支平}$ 为

$$V_{支平} = \frac{Q_{汇}}{S_{支}} - 0.9V_{主中} \quad (2)$$

式中 $Q_{汇}$ 是汇流管总流量, $S_{支}$ 是支流管断面面积。

本文采用固定流速 $V_{\infty}$ ,改变压力 $P_{\infty}$ 来实现研究所需试验工况,空化状态以目测为主,辅以声测加以确定。

## 2 试验成果及其分析

垂直汇流中空化数可定义为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_{汇} = \frac{P_{\infty} - P_v}{0.5\rho V_{\infty}^2} \quad (3)$$

式中 $P_{\infty}$ 为未扰动处压力; $P_v$ 为试验水温下饱和蒸汽压; $\rho$ 为水的密度;而垂直汇流中折算流速为:

$$V_{\infty}' = \frac{S_{\text{主}} + S_{\text{支}}}{S_{\text{汇}}} V_{\infty} \quad (4)$$

式中  $V_{\infty}$  为相应于  $P_{\infty}$  处断面平均流速;  $S_{\text{主}}$ 、 $S_{\text{支}}$  和  $S_{\text{汇}}$  分别为主流管、支流管和汇流管的断面积。

已有的研究一直把临界空化(即初生空化和消失空化)作为空化的一个重要的性态边界(performance boundary)加以研究的,其重要意义在于:首先,临界空化是结构水力设计中有无空化的唯一判断指标;其次,有的研究已经表明,起始空蚀数(inception of damage number)也与临界空化数密切相关,Thiruvengadam, A. 的研究指出<sup>[7]</sup>

$$D_i = C\sigma_i \quad (5)$$

式中  $D_i = \frac{Y}{0.59V_T^2}$  是起始空蚀数,  $Y$  是材料的屈服强度,  $V_T$  是阈速度,  $\rho$  是液体密度,  $C$

是常数,第三,在临界空化的前后,系统流动特性、流动状态,甚至噪声特征都有显著的区别。比如,空化初生以后,由于气核失稳、生长和增多,液体将发生相变,由单相流动转变成两相流;另外,空化初生以后,空化噪声显著增大,以噪声的陡增作为空化初生状态的一种判断已是空化声测研究的一个重要内容。这样,在以往的研究中,往往以临界空化作为空化状态发生性态转变的一个重要指标,把空化的发生、发展和演变过程划分为无空化、临界空化和空化发展 I, 空化发展 II、..., 几个代表过程。

笔者在垂直汇流中空化的研究时发现<sup>[4]</sup>, 以上对空化过程的划分还有很大的不足和模糊性。我们以(1)无量纲空化长度(或称相对空化长度)  $\bar{L} = \frac{1}{nH} \sum_{i=1}^n L_i$ , 即空化区域的统计平均长度与特征高  $H$  之比(其中  $L_i$  是从汇流点开始计算的 actual 空化长度,  $H = 35^{\text{MM}}$ , 作为特征尺寸在本文中是汇流管高度), (2)空化噪声特征和(3)空化的物理特征为空化状态的判断指标的发现,除临界空化状态外,阻塞空化也是空化发展演变过程中性态发生显著变化的一个重要的转折点。在阻塞空化状态前后上述指标和规律有显著的区别。比如,在阻塞空化以后,空化长度  $L$  随其尾部空化数在具有下列线性规律<sup>[6]</sup>

$$\bar{L} = -111\sigma_i + 96 \quad (6)$$

而在阻塞空化以前,(5)式规律不再保持;在空化噪声方面也有类似的规律性,在阻塞空化以后,噪声  $\text{SPL}(f_M)$  与流速无关,仅有尾部空化数有关,可以表示为<sup>[4]</sup>

$$\text{SPL}(f_M) = 133.3\sigma_i + 74.4 \quad (7)$$

式中  $\text{SPL}(f_M)$  是峰值频率的声压级( $\text{dB}$ ), 并且在阻塞空化时,空化噪声达到最大值;而在阻塞空化以前,(6)式规律也不再保持,并且  $\text{SPL}(f_M)$  与流速密切相关<sup>[4]</sup>。这就提醒我们在空化的研究中,也应把阻塞空化视为空化发展过程中另一重要的性态转变指标,考虑到在阻塞空化前后空化特征的支配因素也可能有很大的区别而对阻塞空化前后的空化状态应分别加以研究。这就促使我们对传统的空化状态的分级方法进行分析进而有必要在本文中提出一种新的分级方法,以适应空化空蚀机理的深入研究。本文以临界空化和阻塞空化状态作为空化发生、发展过程中性态转变的两个转折点,把空化的整个发展过程分为三个阶

段,对垂直汇流中空化,把临界空化前的流动状态称之为空化状态;把临界空化状态并阻塞空化状态间的空化演变过程称为空化发展过程,视其特征分别称为空化发展 I、空化发展 II;把阻塞空化以后的空化发展过程称之为超空化发展过程,视其特征分别称之为超空化发展 I,超空化发展 II 和超空化发展 III。以上垂直汇流中各空化状态均用照片作了记录(如图 3 中各照片,  $V_{\infty} = 16.2 \text{ M/S}$ ),现分别加以分析。

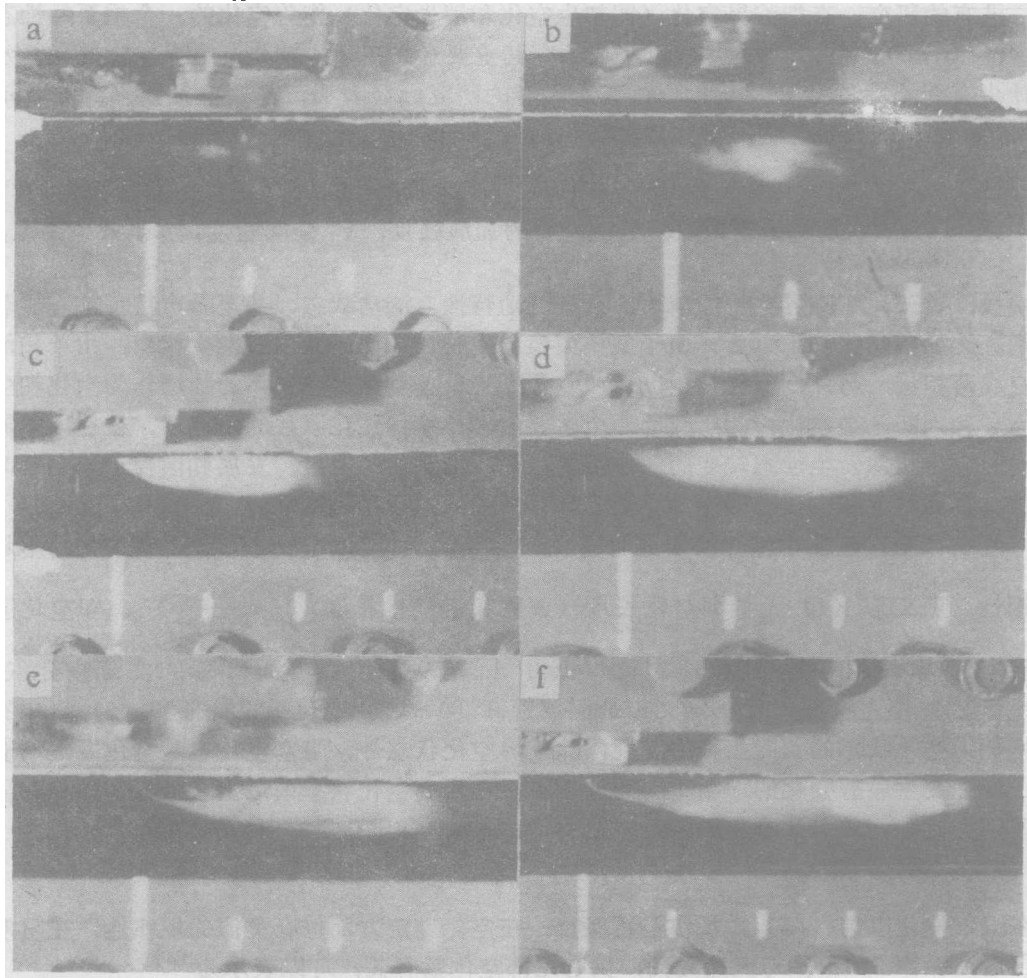


图 3 垂直汇流中各空化状态照片

No	空化状态	$\sigma(\sigma_c)$	L	附注	No	空化状态	$\sigma(\sigma_c)$	L	附注
1	无空化	$< 3.80$	0		5	阻塞空化	2.35 (0.85)	2.0~2.5	照片 c
2	初生空化	3.80	1		6	超空化 I	(0.81)	2.5~3.0	照片 d
3	空化发展 I	3.45	1	照片 a	7	超空化 II	(0.80)	2.5~3.0	照片 e
4	空化发展 II	2.80	1.5	照片 b	8	超空化 III	(0.795)	$> 3.0$	照片 f

从汇流点开始下流区域的流动中无明显空泡可见,此时空化状态可称为无空化状态。一般地,在无空化时系统空化数  $\sigma > \sigma_c$ ,而临界空化数  $\sigma_c$  是指初生空化数  $\sigma_i$  或消失空化数  $\sigma_d$ 。

当空化数  $\sigma$  下降,从汇流点开始上半圆区域清晰可辨空化空泡时的水流状态称之为初生空化状态。在  $L = 1$  的区域,可见一空泡组成的半圆线,首部细而淡,中部断裂,尾

部稍粗浓。本试验模型中在  $V_{\infty} = 16.2 \text{ M/S}$  时,  $\sigma = 3.80$ 。作为临界空化数  $\sigma_c$  的初生空化数  $\sigma_i$  和消失空化数  $\sigma_d$  一直是工程中无空化设计的唯一控制指标。

空化从初生发展以后, 从交汇点开始的整个空化区边界趋于连续, 但中间仍透明 (如图 3 照片 a) 此时空化状态可称为空化发展 I 状态。图 4 是此时用 LDA 二维激光测速仪 (B&K) 测得的在  $L = 0.5$  处的断面流速分布, 明显存在一负流速区, 即存在一与流动方向成直角的横轴漩涡。空化继续发展以后, 空化区变大, 在  $L = 1.5$  的区域均为不透明白雾状, 此时空化状态称为空化发展 II 状态 (见图 3 照片 b)。

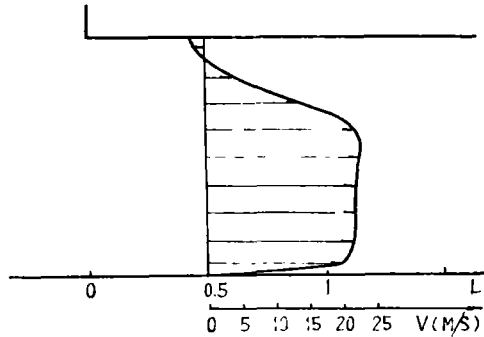


图 4 对应图 5 时在  $L = 0.5$  处断面流速分布

当压力  $P_{\infty}$  随尾阀开度加大而减小某一临界值以后不再变化, 此种空化状态称为阻塞空化状态 (见图 3 照片 c), 相应的  $\sigma_b$  称阻塞空化数。在垂直汇流中, 阻塞空化时空化噪声最强 (如图 5), 在  $\sigma_i < 0.85$ ,  $L$  有良好的线性关系 (如图 6)。

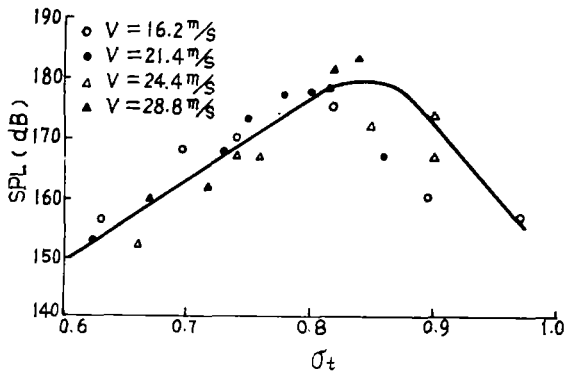


图 5 超空穴空化噪声  $SPL(f_{\infty})$  与  $\sigma_i$  关系 (PVDE) 结果

在垂直汇流一类空化系统中, 阻塞空化可视为超空化过程的一个起点。超空化发生以后, 空化区明显增大, 在  $L = 2.5 \sim 3.0$ , 无空腔发生时的空化状态可称为超空化发展 I 状态 (见图 3 照片 d), 在超空化阶段空化状态可用尾部空化数  $\sigma_t$  控制。在空化区首部既有空腔又有回注水流时的超空化状态称超空化发展 II 状态 (见图 3 照片 e)。这种状态和 Knapp, R, T.<sup>[8]</sup> 在研究二维半圆形首部中段平行于

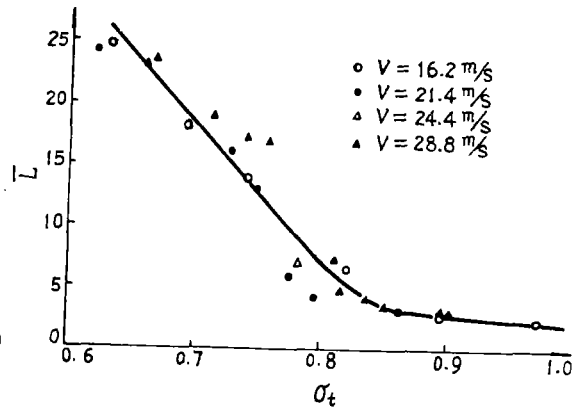


图 6 空化长度脉动  $\bar{L}$  的统计结果

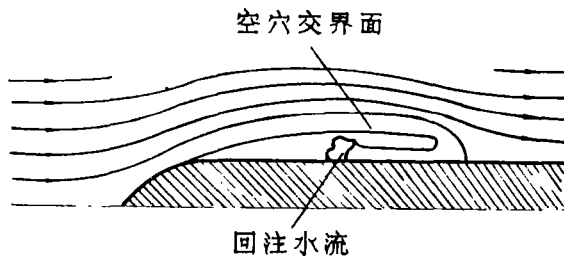


图 7 固定空化水流<sup>[8]</sup>

尾部棱形物体的固定空化机理所获现象很相似 (如图 7), 回注水流对空化空蚀有一定影

响,是一个值得注意的问题。超空化发展Ⅲ状态定义为一种长超空化状态,此时空化区有空腔但无回注水流存在,  $\bar{L} > 3.0$  (见图 3 照片 f)。

### 3 结语

本文对垂直汇流中空化作了系统的试验研究。较为深入地分析了传统的空化发生、发展和演变过程的分级方法,以空化长度,噪声特征和现象特征为依据,对空化过程提出了一种新的分级方法。笔者认为:和临界空化一样,阻塞空化也是一种重要的空化现象,由于阻塞空化前后空化的一些特征有显著的区别,所以对其分别加以研究就极为必要。本文提出的对空化过程的分级方法有其合理性和实用性,对空化空蚀机理的研究有重要的作用。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋玉玺.磨子潭水库泄洪隧洞进口段空蚀破坏原因初步分析.水工隧洞设计经验选编,水利出版社,1981年12月.
- [2] 冉隆义等.龚咀水电站消力塘整治措施试验报告.水电部成都院科研所,1987年10月.
- [3] Kenn,M.J, Garrod, A.D:1974年塔贝拉隧洞坍塌和空蚀破坏.高速水流译文选集,水利水电水建筑高速水流情报网,1983年12月.
- [4] 吴建华.空化噪声量测技术和垂直汇流空化研究.河海大学博士论文,1989年4月.
- [5] 吴建华,柴恭纯.垂直汇流漩涡空化的声测研究.水利水运科学研究,1989年第3期.
- [6] 吴建华,柴恭纯,郭子中.垂直汇流中空化长度的脉动.水动力学研究与进展,1989年第4期.
- [7] Thiuvengadam A. A United Theory of Cavitation Damage. Trans. ASME, T.B.Eng., vol.85, 1963.
- [8] Knapp, R.T. Recent Investigations of the Mechanisms of Cavitation and Cavitation Damage. Trans., ASME, vol.80, 1955.

### Discussion of Cavitation Stages in Vertical Intersection Flows

Wu Jianhua

(Nanjing Hydraulic Research Institute)

**Abstract:** It is essential to profoundly understand phenomena, characteristics and mechanisms of cavitation for computing cavitation load and predicting such damage. Some characteristics are studied in the paper of cavitation occurrence and development in vertical intersection flow apparatus designed by the author based the examples of cavitation and its damage in hydro-electrical engineering projects. A new method of cavitation stages is presented with incipient cavitation and blocking cavitation which are two important performance boundaries. Cavitation photos of varying stages are taken in the model in  $10^{-3}$  second per photo.

**Keywords:** Cavitation, Cavitation stage, Vertical intersection flow